رفتار مکانیکی خاک‌های رسی مخلوط با خرده لاستیک★

امین ارثی‌زاد[۱] حسین سلطانی جیقه[۲] محرم اسدزاده[۳]

چکیده *امروزه از مخلوط خاک رس خالص با خرده لاستیک به‌عنوان مصالح ساخت در برخی از پروژه‌های عمرانی استفاده می‌شود. با توجه به گسترش کاربرد این خاک‌ها، شناخت رفتار مکانیکی و تعیین خواص آنها ضروری است. بدین منظور، آزمایش‌های سه‌محوری یکنواخت (Monotonic) زهکشی‌نشده بر روی نمونه‌های متراکم رس خالص و مخلوط «رس- خرده لاستیک» انجام می‌شود. نمونه‌های مخلوط از اختلاط دو نوع رس خالص با خرده لاستیک با درصد وزنی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ تهیه شدند. نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که مقاومت برشی و فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در نمونه‌ها، به درصد خرده لاستیک در خاک مخلوط و نوع رس بستگی دارد. به‌طوری‌که بسته به نوع رس مورد استفاده در مخلوط، درصد اختلاط بهینه‌ای برای خرده لاستیک وجود دارد.*

واژه‌های کلیدی مخلوط رس- خرده لاستیک، آزمایش سه‌محوری زهکشی‌نشده، مقاومت برشی، فشار آب حفره‌ای.

Behavior of Clayey Soils Mixed with Tire Chips

A. Ersizad H. Soltani-Jigheh M. Asadzadeh

Abstract *Recently, mixtures of clay-tire chips are used as construction material in civil engineering projects. With respect to the tending for using these materials, it is necessary to know their mechanical behavior. Thereby, a number of undrained monotonic triaxial tests are carried out on the specimens of pure clay and clay-tire chip mixtures. Mixed specimens prepared by mixing pure clay with 10%, 20%, and 30% tire chips in weight. The results of the tests indicate that shear strength and pore water pressure due to shearing depend on the amount of tire-chips and clay type. As dependent on the clay type used in the mixtures, there is an optimum content for tire-chips to mix with the clay.*

Keywords Clay-Tire Chip Mixtures, Undrained Triaxial Test, Shear Strength, Pore Water Pressure.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۲/۲/۳۱ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/۱۰/۵ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول، کارشناس ارشد خاک و پی، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان.

(۲) استادیار گروه عمران، دانشکده‌ی فنی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان.

(۳) کارشناس ارشد خاک و پی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد زنجان.

مقدمه

هر سال در جهان حجم زیادی از لاستیک تایرها به‌عنوان زباله‌های غیرقابل تجزیه بر روی هم انباشته شده و یا در حجم وسیعی داخل زمین دفن می‌گردند. این توده‌های لاستیک نه تنها سبب آلودگی محیط زیست می‌شوند بلکه باعث به خطر افتادن سلامتی انسان و ایجاد آتش‌سوزی نیز می‌شوند. علاوه بر این، لاستیک‌ها نسبت به سایر زباله‌ها از چگالی کمتری برخوردارند و در نتیجه حجم زیادی را در مدفن‌های زباله اشغال می‌کنند. با توجه به مطالب گفته شده و غیرقابل تجزیه بودن لاستیک تایرها، لازم است توجه ویژه‌ای به مدیریت این مواد داده شود.

مطابق با نظر هامفری [1] استفاده از خرده‌لاستیک در مهندسی عمران مزایای زیادی دارد که از آن جمله می‌توان به چگالی کم لاستیک، قابلیت دوام و سازگاری بالا، عایق حرارتی بالا و در بسیاری از موارد هزینه‌ی تمام شده‌ی پایین در مقایسه با سایر مصالح خاکریز اشاره نمود. بدین علت اخیراً امکان استفاده از خرده‌لاستیک در خاکریزی بزرگراه‌ها، خاکریزی پشت سازه‌های حائل قرار گرفته بر روی خاک‌های سست یا قابل تراکم توسط محققان بررسی شده است. بنابراین، شناخت دقیق‌تر رفتار مکانیکی این مصالح در شرایط مختلف بارگذاری نیاز به مطالعه و بررسی بیشتری دارد.

در این تحقیق، رفتار خاک‌های رسی مخلوط تحت بارگذاری یکنواخت با انجام آزمایش‌های سه‌محوری تحکیم‌یافته همسان زهکشی‌نشده (CIU) بر روی نمونه‌های متراکم رس خالص، مخلوط «رس ــ خرده‌لاستیک» مطالعه شده است، و اثر درصد خرده لاستیک و اثر نوع رس بر رفتار تنش‌ـ کرنش، تغییرات فشار آب حفره‌ای و مسیر تنش مطالعه می‌شود. در این مقاله، ابتدا تاریخچه‌ی مختصری از مطالعات انجام شده ارائه و سپس مصالح و برنامه‌ی آزمایش‌ها معرفی می‌شوند. در نهایت نتایج آزمایش‌های سه‌محوری بر حسب پارامترهای مختلف ارائه و مورد ارزیابی و تحلیل قرار می‌گیرند.

تاریخچه

اخیراً نتایج مطالعات انجام گرفته در زمینه‌ی تسلیح خاک رس با مصالح دانه‌ای نشان‌دهنده‌ی اثر مثبت خاک‌های دانه‌ای بر روی مقاومت رس می‌باشد [۲,6]. هور و همکاران [7] با انجام آزمایش‌های تراکم و CBR بر روی مخلوط ماسه‌ی شکسته و مسلح شده با الیاف پلی‌پروپیلن نشان دادند که افزودن الیاف به ماسه انرژی مورد نیاز برای رسیدن به یک تراکم مشخص را افزایش می‌دهد و باعث افزایش CBR می‌شود. عبدی و پارساپژوه [۸] با انجام آزمایش‌های نفوذپذیری و تحکیم بر روی نمونه‌های رسی مسلح‌شده با الیاف پلی‌پروپیلن، خواص نفوذپذیری و نشست‌پذیری این مخلوط‌ها را بررسی کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش درصد الیاف در مخلوط مقدار نشست کم می‌شود؛ به‌طوری‌که در نمونه‌ی مخلوط حاوی ۸ درصد الیاف به طول ۵ میلی‌متر کمترین نشست دیده شد. هم‌چنین میزان نفوذپذیری با افزایش درصد الیاف تا چند برابر افزایش می‌یابد.

نتایج حاصل از بررسی‌های انجام گرفته توسط عبدی و همکاران [۹] بیانگر این است که کاربرد الیاف طبیعی و مصنوعی به‌طور محسوس مقاومت برشی و شکل‌پذیری نمونه‌های مسلح شده کائولینیت را افزایش می‌دهد.

درصد وزنی و عرض خرده لاستیک‌ها، وضعیت ظاهری آنها، میزان تراکم و تنش نرمال وارد از عوامل مؤثر بر روی مقاومت برشی مخلوط ماسه و خرده‌لاستیک می‌باشند. نمونه‌های مخلوط ماسه و خرده‌لاستیک وقتی که درصد خرده‌لاستیک بیشتر باشد و نمونه‌ها متراکم‌تر باشند، رفتار اتساعی‌تری دارند. با افزایش درصد خرده لاستیک‌ها و درصد تراکم مخلوط‌ها، زاویه‌ی اصطکاک داخلی نمونه‌های مخلوط بیشتر می‌شود [10].

در تحقیق به عمل آمده توسط قضاوی و برمکی

[۱۱] اثر افزودن خرده‌لاستیک بـه بنتونیـت در خـواص انقباضی و مقایسه‌ی آن با مخلوط ماسه و خرده‌لاستیک مـورد بررسـی قـرار گرفـت. تحقیـق بـا انجـام تعـداد قابل‌توجهی از آزمایش‌های حد انقباض بر روی نمونه‌های مخلوط با درصدهـای مختلـف حجمـی صـورت گرفته اسـت. نتـایج حـاکی از اثـرات قابـل‌ملاحظـه‌ی اصلاح خـواص انقباضـی بنتونیـت بـا خـرده‌لاسـتیک می‌باشد. به طوری‌که با افزایش درصـد خـرده‌لاسـتیک حد انقباض مخلوط بنتونیت- خـرده‌لاسـتیک افـزایش می‌یابد، و ترک‌های ایجاد شـده حاصـل از انقبـاض از نظر طول و عرض کاهش می‌یابنـد. در مقایسـه‌ی ایـن نتایج با رفتار مخلوط مشابه بنتونیـت- ماسـه ملاحظـه می‌گردد که از لحاظ اثرگذاری بر حد انقباض، تفـاوت چندانی وجود ندارد.

اینگلـد و میلـر [12] بـا انجـام آزمـایش‌هـای سه‌محوری زهکشی‌شده بر روی رس کائولینیت مسـلح با صفحه‌ی پلاستیکی مشبک نشان دادند کـه مقاومـت رس مسلح نسبت به رس خالص بیشـتر اسـت و نـرخ افـزایش در مقاومـت صـفحات انـدازه‌ی چشـمه‌هـای کوچک بیشتر است. آنان با انجام آزمایش سـه‌محـوری زهکشی‌نشده بر روی نمونه‌های رس کائولینیت و رس لنـدن مسـلح بـا پلـی‌اتـیلن مشـبک، نمـد سـوراخ و ژئوتکستایل تأثیر جنس مسلح‌کننده را بر مقاومت خاک مسلح بررسی نمودند. اینگلـد [13] بـا انجـام آزمـایش برش مستقیم بر روی خاک‌های چسبنده نشـان داد کـه مسلح‌کننده‌هـای شـبکه‌ای بیشـترین اثـر را در افـزایش مقاومت و کرنش گسیختگی نسبت به مسلح‌کننده‌هـای صفحه‌ای و نواری دارند.

بوسـچر و همکـاران [14] گـزارش کردنـد کـه خاک‌ریز ساخته شده با مخلوط ماسه و خرده‌لاسـتیک، حتی زمانی که در معرض بارهای سنگین قرار می‌گیرد، رفتار رضایت‌بخشی نسـبت بـه ماسـه‌ی خـالص دارد. اندرزلنـد و ختـک [15] تـأثیر افـزودن نـوعی الیـاف سلولزی بر مقاومت برشی و رفتار تـنش- کـرنش رس کائولینیت را با انجام آزمایش‌های سه‌محـوری بررسـی کردند. نتایج نشان داد که افزودن الیاف باعـث افـزایش مقاومت برشـی و شـکل‌پـذیری مخلـوط مـی‌گـردد و جاذبه‌ی بین ذرات رس و الیاف، باعث ایجـاد پیونـدی مناسب برای انتقال بار می‌گردد. هم‌چنین ایـن محققـان دریافتنـد کـه الیـاف باعـث افـزایش مقاومـت برشـی زهکشی‌نشده‌ی خاک می‌شود. تحقیقی دیگر نشـان داد که افزایش میزان مقاومت فشاری تحت تأثیر دو فاکتور مقدار الیاف و میزان رطوبت تراکم می‌باشد [16].

چتین و همکاران [17] با مقایسه‌ی نتایج آزمـایش تراکم مخلوط‌های رس- خرده‌لاسـتیک و رس خـالص نشان دادند که وزن مخصوص خشک مخلوط‌ها کمتـر از وزن مخصوص خشک خـاک رس مـی‌باشـد. یعنـی اینکه پتانسیل خوبی برای استفاده از خرده لاسـتیک‌هـا بـه‌عنـوان مصـالح خـاک‌ریـز سـبک وجـود دارد. آنهـا هم‌چنین با انجام آزمایش‌های بـرش مسـتقیم بـر روی مخلوط‌های رس- خرده‌لاستیک دریافتند که با افـزایش درصد خرده‌لاستیک مخلوط، در تنش‌های نرمال کمتر، کرنش قائم قابل‌ملاحظه‌ای در نمونه ایجاد نمی‌شـود و یا تغییرحجم مشخصی در طول آزمایش برش در نمونه دیده نمی‌شود. ولی در تنش‌هـای نرمـال زیـاد افـزودن خرده‌لاستیک کرنش قائم نمونه‌ها را کـاهش مـی‌دهـد. هم‌چنین میزان نفوذپذیری مخلوط‌ها با افـزایش میـزان خرده‌لاستیک و کاهش تنش نرمال وارد افزایش می‌یابد. نفوذپذیری هر دو نـوع خـرده‌لاسـتیک ریـز و درشـت به‌تنهایی همانند انواع ماسه‌ها می‌باشد که این بیانگر این است که مـی‌تـوان از خـرده‌لاسـتیک‌هـا بـه‌تنهـایی یـا ترکیب‌شان با ماسه، به‌عنـوان مصـالح خـاکریز اسـتفاده نمود. از طرف دیگر، پارامترهای مقاومت برشی حاصل از آزمایش‌ها برش مستقیم نشـان مـی‌دهـد بـا افـزودن لاستیک ریز و درشت به خاک رس، مقادیر چسـبندگی افزایش و زاویه‌ی اصطکاک کاهش می‌یابند این روند تا جایی ادامه می‌یابد که درصد اختلاط لاسـتیک بـه ٪۴۰ برسد. بـا افـزایش درصـد لاسـتیک از ٪۴۰ بـه ٪۵۰ و ٪۱۰۰ میزان چسـبندگی کـاهش و زاویـه‌ی اصـطکاک داخلی افزایش می‌یابد.

کومار و همکاران [18] به‌منظور بررسی اثر الیـاف پلی‌استر بر روی رس، آزمایش‌های فشاری تک‌محوری

انجام دادند و استنتاج کردند که با تسلیح خاک تراکم‌پذیر به‌وسیله‌ی الیاف‌های پلی‌استر، مقاومت فشاری تک‌محوری به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. مختاری و همکاران [۱۹] با انجام آزمایش‌های CBR و تراکم، اثر افزودن الیاف پلی‌پروپیلن بر رفتار مکانیکی مخلوط خاک- آهک را بررسی نمودند. نتایج نشان داد که افزودن الیاف باعث افزایش مقاومت و شکل‌پذیری مخلوط خاک- آهک می‌گردند و آن را از حالت ترد و شکننده خارج می‌سازد. هم‌چنین افزایش طول الیاف وافزایش درصد وزنی الیاف (در یک طول ثابت)، سبب بیشتر شدن CBR و رطوبت بهینه و کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر می‌شود.

در این تحقیق به‌منظور پی بردن به رفتار مکانیکی مخلوط رس- خرده لاستیک، ابتدا با استفاده از آزمایش‌های تراکم روی نمونه‌ها، درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک ماکزیمم نمونه‌ها تعیین می‌شود و سپس بر روی نمونه‌ها، آزمایش‌های سه‌محوری زهکشی‌نشده در سه فشار محصورکننده‌ی متفاوت انجام می‌گردد. برای ارزیابی اثر درصد لاستیک و نوع رس بر روی رفتار مخلوط‌ها، نمونه‌ها با درصدهای متفاوت خرده‌لاستیک و با دو نوع رس متفاوت تهیه می‌شوند. در نهایت، بر مبنای نتایج حاصل از این آزمایش‌ها، ارزیابی‌های لازم در خصوص رفتار تنش- کرنش و فشار آب حفره‌ای نمونه‌ها بر حسب درصد خرده‌لاستیک و نوع رس صورت می‌گیرد.

مصالح استفاده شده و برنامه‌ی آزمایش

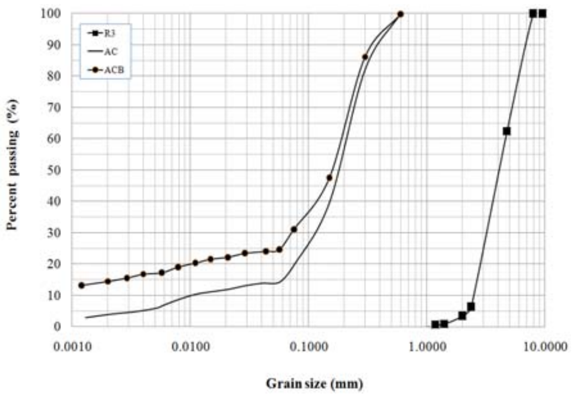
دستگاه آزمایش سه‌محوری

برای انجام آزمایش‌ها، از دستگاه سه‌محوری دیجیتالی استفاده شده است. فشار جانبی موردنیاز به‌وسیله‌ی یک کمپرسور با ظرفیت ۱۲ بار (۱۲۰۰kPa) تأمین می‌گردد. بار محوری برای انجام آزمایش‌های برشی به‌وسیله‌ی جک هیدرولیکی اعمال می‌شود. تمام اندازه‌گیری‌ها، به‌جز تغییرات حجم نمونه، به‌صورت اتوماتیک و با دقت بالا انجام می‌گیرد.

مصالح

۸ نمونه خاک متراکم، شامل ٦ مخلوط رس- خرده‌لاستیک و دو نوع رس خالص متفاوت مورد آزمایش قرار گرفتند. نمونه‌های مخلوط از اختلاط دو نوع رس خالص با یک نوع خرده‌لاستیک با درصد وزنی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ تهیه شدند. توده ویژه‌ی ذرات خرده‌لاستیک مصرفی ۰/۹۸۸ تعیین گردید. منحنی دانه‌بندی خرده‌لاستیک و رس‌های خالص در شکل (۱) نشان داده شده است. حد روانی و شاخص خمیری میانگین مصالح چسبنده استفاده شده اصلی به‌ترتیب برابر با ۳۳٪ و ۱۲، و توده‌ی ویژه آن ۲/٦۹۸ است. رس مذکور براساس سیستم طبقه‌بندی متحد (USCS) در گروه CL قرار می‌گیرد [20] و در این تحقیق با علامت AC معرفی می‌گردد.

برای بررسی اثر نوع رس بر روی رفتار مکانیکی مخلوط‌های رس– خرده‌لاستیک، یک نوع رس مصنوعی از مخلوط کردن ۸۰٪ رس و ۲۰٪ رس بنتونیت تجاری تهیه شد. حد روانی و شاخص خمیری این رس مخلوط به‌ترتیب برابر با ٦۱٪ و ۳۳ و توده‌ی ویژه آن ۲/٦۳۹ تعیین شد که در این تحقیق با علامت ACB مشخص می‌شود. این خاک براساس سیستم طبقه‌بندی متحد (USCS) در گروه CH قرار می‌گیرد [20].



شکل ۱ منحنی دانه‌بندی خرده‌لاستیک و دو نوع رس

تهیه‌ی نمونه‌ها و انجام آزمایش

برای تهیه‌ی نمونه‌های مختلف، خاک رس با مقادیر مختلف خرده‌لاستیک مخلوط گردید که فهرست این نمونه‌ها به همراه برخی از مشخصات آنها در جدول (۱) آمده است. در نام‌گذاری نمونه‌ها علامت R3 اشاره به خرده‌لاستیک دارد و علائم AC و ACB نوع رس را نشان می‌دهند. عدد نوشته شده در کنار نام نمونه‌ها، بیانگر درصد وزنی رس در نمونه‌ها می‌باشد. به‌عنوان مثال، نمونه‌ی ساخته شده از ۷۰٪ رس خالص AC با علامت R3-AC70 نشان داده می‌شود.

جدول ۱ درصدهای مختلف خاک رس و خرده‌لاستیک در نمونه‌های مختلف و مشخصات آنها

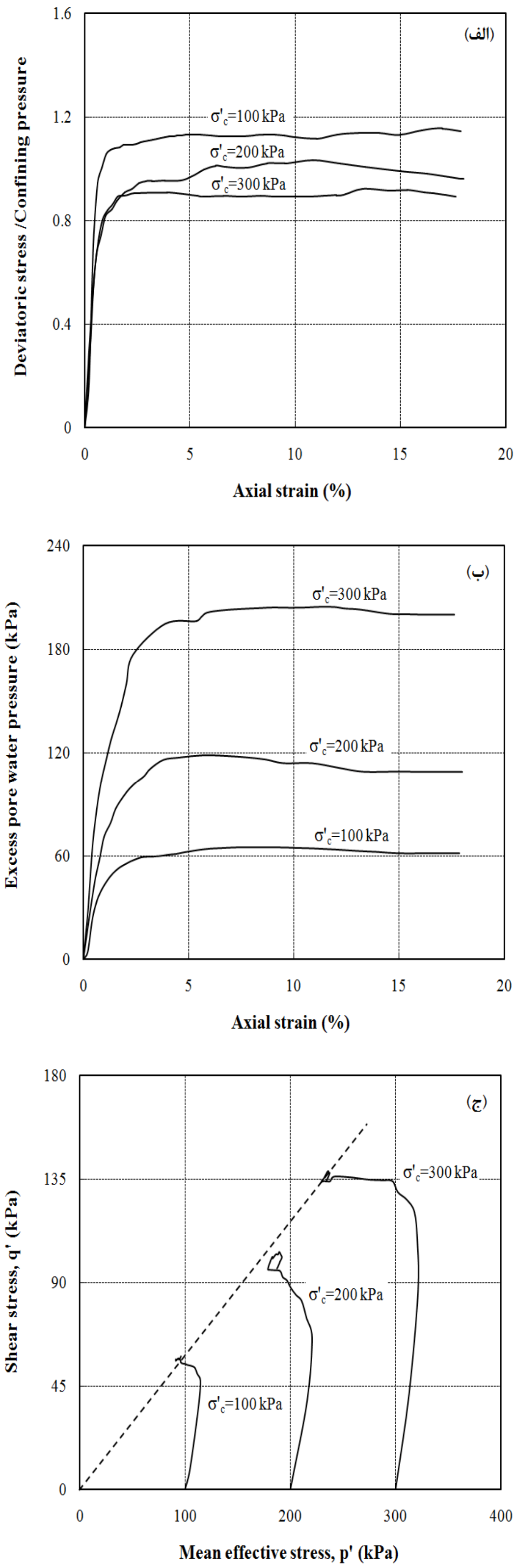
نام نمونه	رس (٪)	خرده‌لاستیک(٪)	دانسیته خشک (kN/m³)	درصد رطوبت (٪)
AC100	۱۰۰	۰	۱۶/۳۵	۱۹/۵۰
R3-AC90	۹۰	۱۰	۱۵/۲۰	۱۹/۵٤
R3-AC80	۸۰	۲۰	۱٤/٤۰	۱۸/۰۰
R3-AC70	۷۰	۳۰	۱۳/۸۰	۱٦/۲۵
ACB100	۱۰۰	۰	۱٤/۷۸	۲۱/۷۵
R3-ACB90	۹۰	۱۰	۱۳/٦۳	۲۰/۰۰
R3-ACB80	۸۰	۲۰	۱۳/٤۲	۱۹/۲۵
R3-ACB70	۷۰	۳۰	۱۳/۱۰	۲۰/۲۵

از آنجایی که در این تحقیق رفتار خاک رس مخلوط از دیدگاه کاربرد آنها در خاکریزهای متراکم مورد نظر است، نمونه‌ها با رطوبت یک درصد بیشتر از رطوبت بهینه و دانسیته‌ی معادل با ۹۵٪ وزن مخصوص خشک حداکثر حاصل از آزمایش پروکتور استاندارد تهیه شدند [21]. قطر و ارتفاع نمونه‌ها به‌ترتیب ۵ و ۱۰ سانتی‌متر بود. نمونه‌ها در سه لایه تهیه شدند و به‌منظور ثابت ماندن درصد اختلاط مصالح در لایه‌ها، مصالح هر لایه جداگانه در داخل کیسه پلاستیکی با آب مخلوط شدند و برای اطمینان از پخش یکنواخت رطوبت، هر نمونه حدود ۲٤ ساعت بعد از آماده‌سازی لایه‌ها ساخته شد. هم‌چنین برای ایجاد اتصال بهتر بین لایه‌های متوالی در حین تراکم، سطح هر لایه پس از تراکم خراش داده شد. نمونه‌ها پس از آماده‌سازی درون محفظه‌ی سه‌محوری قرار داده شدند. سپس به‌منظور اشباع نمونه‌ها، آب مقطر از داخل آنها عبور داده شده و سپس با اعمال تدریجی پس‌فشار از بالای نمونه‌ها اشباع گردیدند. پس‌فشار نهایی برای اشباع نمونه‌ها ۳۳۵kPa در نظر گرفته شد و پس از این‌که مقدار B به بیشتر از ۰/۹۷ رسید نمونه‌ها اشباع فرض شدند.

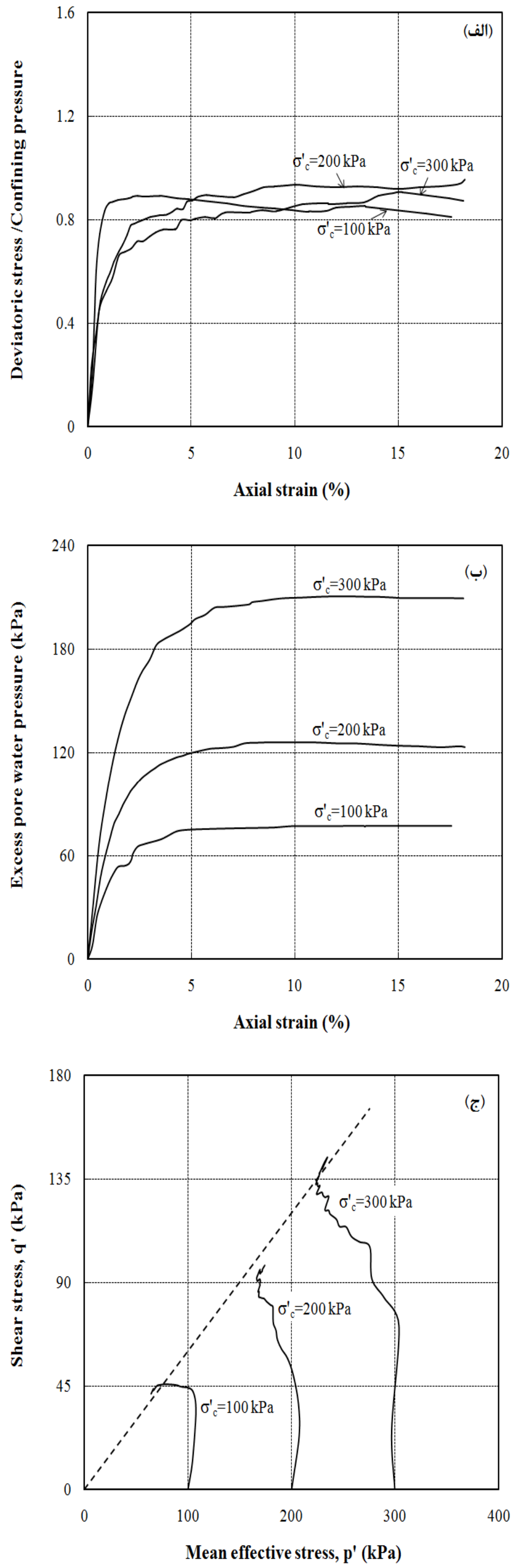
بعد از اشباع شدن، نمونه‌ها تحت تنش‌های مؤثر محصورکننده‌ی ۱۰۰kPa، ۲۰۰kPa و ۳۰۰kPa تحکیم شدند. پس از پایان مرحله‌ی تحکیم، آزمایش‌های سه‌محوری فشاری زهکشی‌نشده از نوع کنترل کرنش بر روی نمونه‌ها انجام شد. کلیه‌ی آزمایش‌ها تا کرنش ۱۸٪ ادامه یافت و برای اطمینان از ایجاد فشار آب حفره‌ای یکسان در سراسر نمونه در حین بارگذاری برشی، سرعت بارگذاری ۰/۰۵ ٪/min انتخاب شد.

نتایج

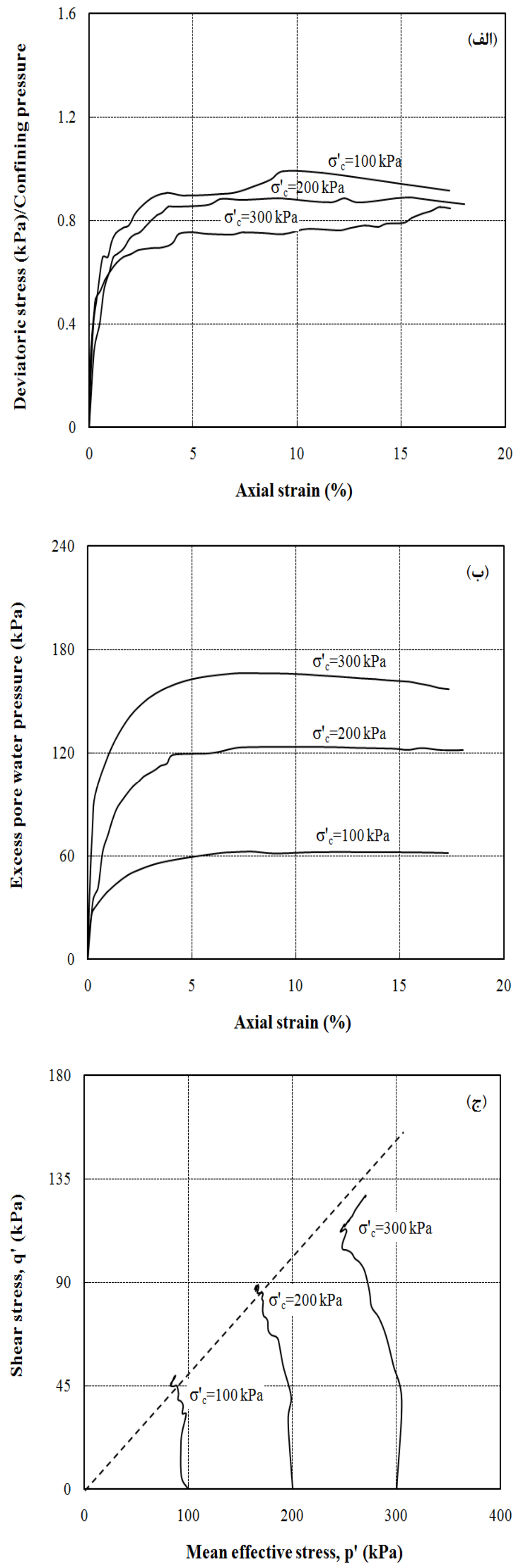
منحنی تنش انحرافی، فشار آب حفره‌ای و مسیرتنش (در صفحه‌ی q':p') برای نمونه‌ها و تنش‌های محصورکننده‌ی مختلف در شکل‌های (۲) تا (۵) نشان داده شده است. در نمودارهای تنش انحرافی و فشار آب حفره‌ای، محورقائم به‌ترتیب نسبت تنش انحرافی به فشار همه‌جانبه ($\Delta\sigma_d/\sigma'_3$) و فشار آب حفره‌ای (Δu)، و محور افقی هر دو نمودار کرنش محوری (ε_a) می‌باشد. در نمودارهای مسیرتنش، محور افقی تنش مؤثر میانگین ($p'=(\sigma'_3+\sigma'_1)/2$) و محور قائم تنش برشی ($q'=(\sigma'_1-\sigma'_3)/2$) است.



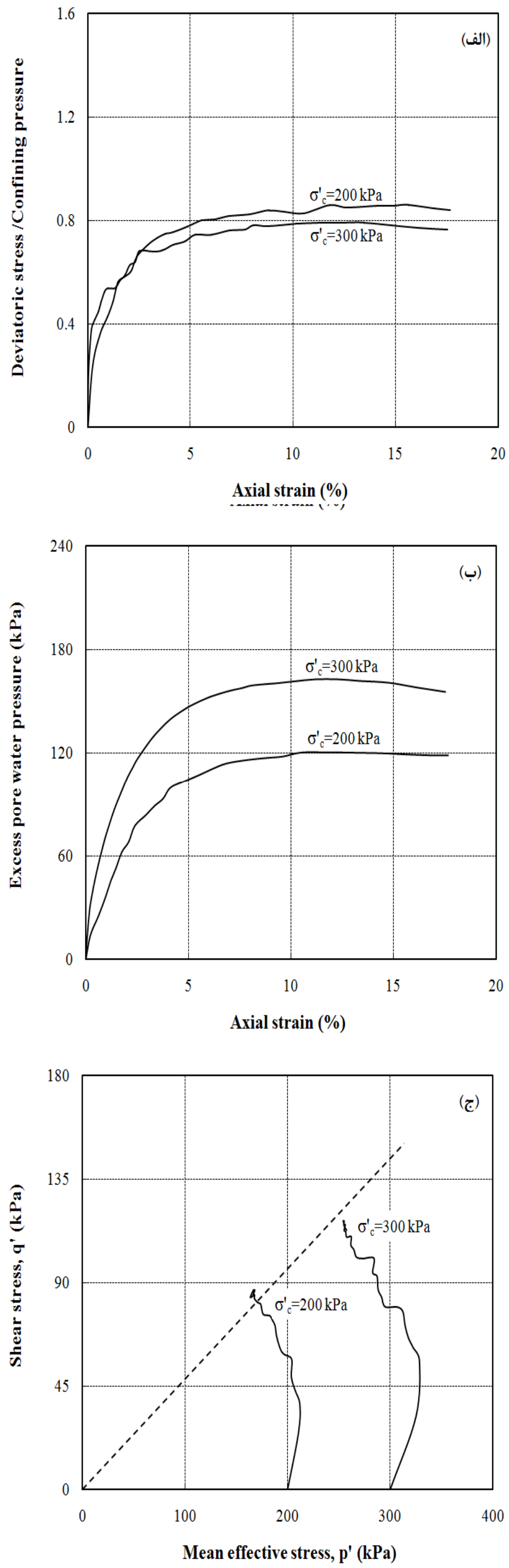
شکل ۲ نتایج آزمایش‌های سه‌محوری بر روی نمونه‌های رس AC100 در تنش‌های محصورکننده‌ی مختلف: الف) منحنی تنش انحرافی، ب) تغییرات فشار آب حفره‌ای و ج) مسیرتنش



شکل ۳ نتایج آزمایش‌های سه‌محوری بر روی نمونه‌های مخلوط R3-AC90 در تنش‌های محصورکننده‌ی مختلف: الف) منحنی تنش انحرافی، ب) تغییرات فشار آب حفره‌ای و ج) مسیرتنش



شکل ٤ نتایج آزمایش‌های سه‌محوری بر روی نمونه‌های رس ACB100 در تنش‌های محصورکننده‌ی مختلف: الف) منحنی تنش انحرافی، ب) تغییرات فشار آب حفره‌ای و ج) مسیرتنش



شکل (٥): نتایج آزمایش‌های سه‌محوری بر روی نمونه‌های مخلوط R3-ACB90 در تنش‌های محصورکننده‌ی مختلف: الف) منحنی تنش انحرافی، ب) تغییرات فشار آب حفره‌ای و ج) مسیرتنش

بحث بر روی نتایج

در این بخش به بررسی اثر درصد خرده‌لاستیکو اثر نوع رس بر روی رفتار تنش– کرنش، فشار آب حفره-ای و مقاومت برشی نمونه‌ها پرداخته می‌شود.

اثر درصد خرده‌لاستیک

رفتار تنش– کرنش. برای بررسی اثر درصد خرده‌لاستیک بر روی رفتار نمونه‌ها، منحنی‌های تنش انحرافی، تغییرات فشار آب حفره‌ای و مسیر تنش نمونه‌های با مقادیر مختلف خرده‌لاستیک برای نمونه‌های مخلوط رس AC و ACB با خرده‌لاستیکR3 به‌ترتیب در شکل‌های (٦) و (۷) ارائه می‌شود. این شکل‌ها نشان می‌دهند که در تمامی تنش‌های محصورکننده، با افزایش درصد خرده لاستیک، روند کلی تغییرات مقاومت برشی در سطوح کرنش پایین کاهشی است. در سطوح کرنش بالا، تغییرات مقاومت برشی با درصد خرده‌لاستیک برای برخی نمونه‌ها کاهشی و برای برخی دیگر افزایشی است.

با بررسی تغییرات مقاومت برشی نمونه‌ها می‌توان دریافت که برای نمونه‌های مخلوط AC (با نشانه‌ی خمیری پایین) در فشار محصورکننده‌ی ۱۰۰kPa، مقاومت برشی نمونه‌های حاوی ۱۰٪ خرده‌لاستیک نسبت به رس خالص کمتر می‌شود و با افزایش درصد خرده‌لاستیک به ۲۰٪ و۳۰٪، میزان مقاومت برشی نیز بیشتر می‌گردد. همچنین در فشارهای محصورکننده ۲۰۰kPa و ۳۰۰kPa، صرفنظر از یک استثنا، با افزایش خرده‌لاستیک در نمونه‌ها تا ۲۰٪ مقاومت برشی کاهش می‌یابد و سپس میزان مقاومت برشی نمونه‌های حاوی ۳۰٪ خرده‌لاستیک مجدداً بیشتر می‌شود و مقدار آن تقریباً برابر مقاومت برشی رس خالص است.

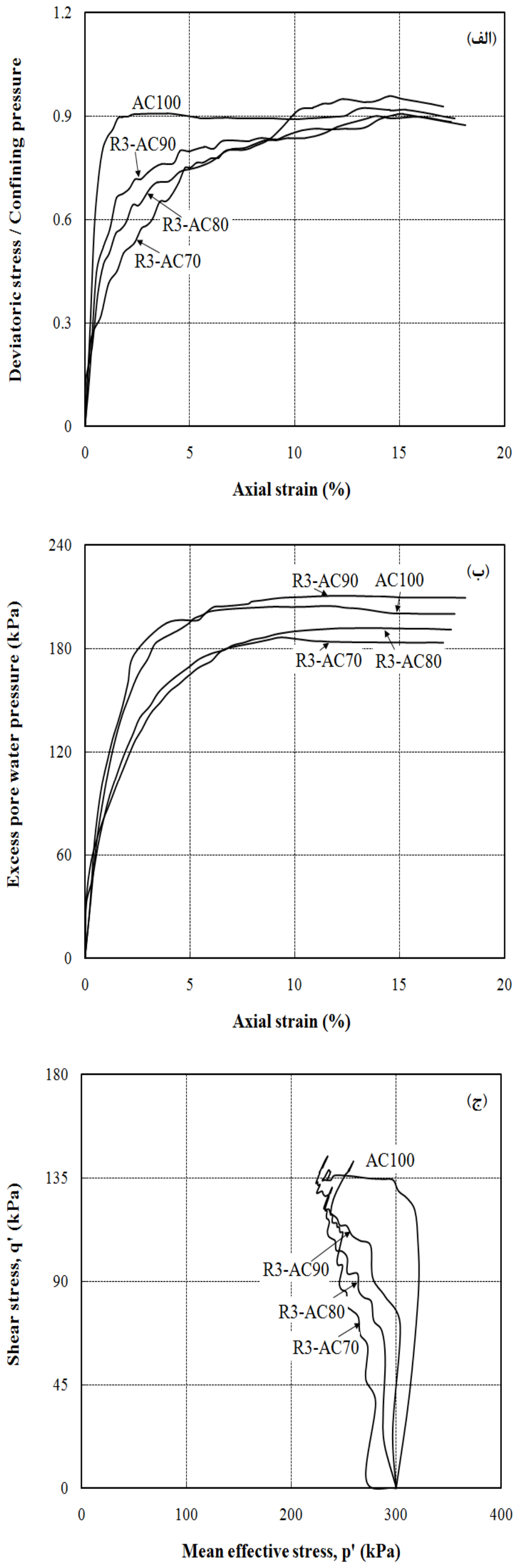
همچنین با بررسی نتایج مقاومت برشی نمونه‌های مخلوط رس ACB (با نشانه‌ی خمیری بالا) ملاحظه می‌گردد که یک رابطه‌ی نزولی مابین مقاومت برشی و درصد لاستیک وجود دارد به‌گونه‌ای که هر چه درصد خرده‌لاستیک بیشتر می‌شود میزان مقاومت برشی نمونه‌ها نسبت به رس خالص کاهش می‌یابد.

به‌منظور ارزیابی بهتر اثر درصد خرده‌لاستیک بر روی مقادیر پارامترهای مقاومت برشی، منحنی زاویه‌ی اصطکاک داخلی در برابر درصد خرده‌لاستیک در شکل (۸) ارائه شده است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها بیانگر این است که افزودن خرده‌لاستیک به خاک رس AC و ACB دو اثر کاملاً متفاوت دارد. به این صورت که با افزودن ۱۰٪ خرده‌لاستیکبه خاک رس نوع AC زاویه اصطکاک داخلی افزایش یافته و سپس هر چه درصد خرده‌لاستیکبه خاک زیاد می‌شود زاویه‌ی اصطکاک داخلی کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، با افزودن ۱۰٪ خرده‌لاستیک به خاک رس نوع ACB زاویه‌ی اصطکاک نسبت به رس خالص کاهش و سپس با افزایش درصد خرده لاستیک، زاویه‌ی اصطکاک داخلی افزایش می‌یابد.

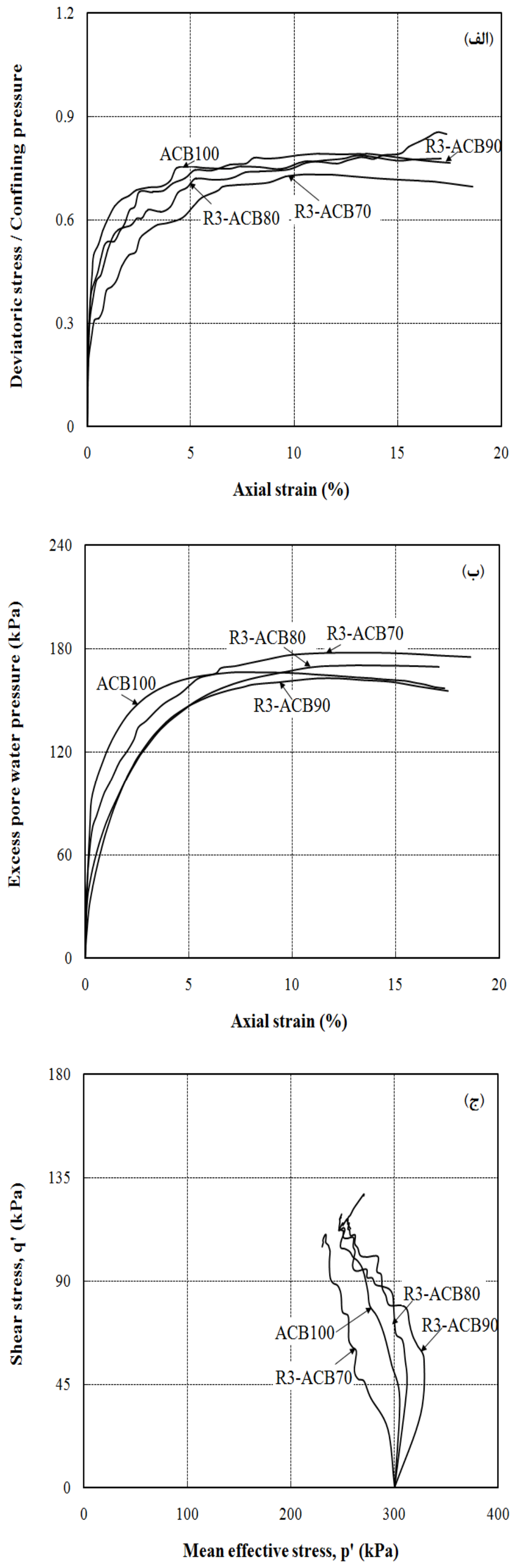
همچنین با توجه به شکل ملاحظه می‌گردد که هم‌گرایی مقادیر زاویه‌ی اصطکاک در نمونه‌های مخلوط رس- خرده‌لاستیکبرای دو نوع رس با افزایش درصد خرده‌لاستیک بیشتر می‌گردد به‌طوری‌که پیش‌بینی می‌شود تقریباً با افزودن ۳۵٪ خرده‌لاستیک به هر دو نوع رس، مقدار زاویه‌ی اصطکاک نمونه‌ها مساوی شود.

فشار آب حفره‌ای (Δu) ناشی از برش

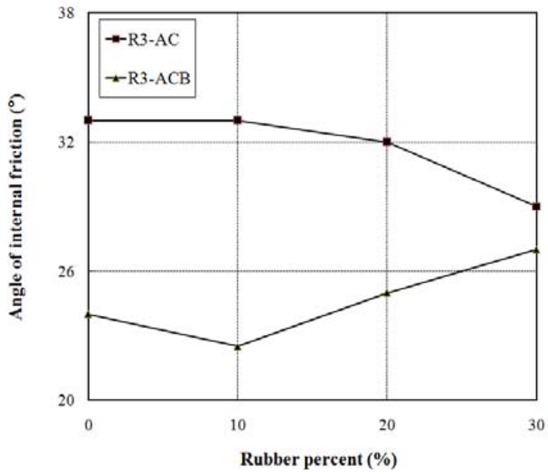
برای بررسی اثر خرده‌لاستیک بر روی فشار آب حفره-ای، تغییرات فشار آب حفره‌ای حداکثر (Δu_{max}) با درصد خرده‌لاستیک در تنش‌های محصورکننده‌ی مختلف در شکل (۹) رسم شده است.



شکل ٦ نتایج آزمایش‌های سه‌محوری بر روی نمونه‌های مخلوط R3-AC تحت تنش محصورکننده‌ی ۳۰۰kPa: الف) منحنی تنش انحرافی، ب) تغییرات فشار آب حفره‌ای و ج) مسیرتنش



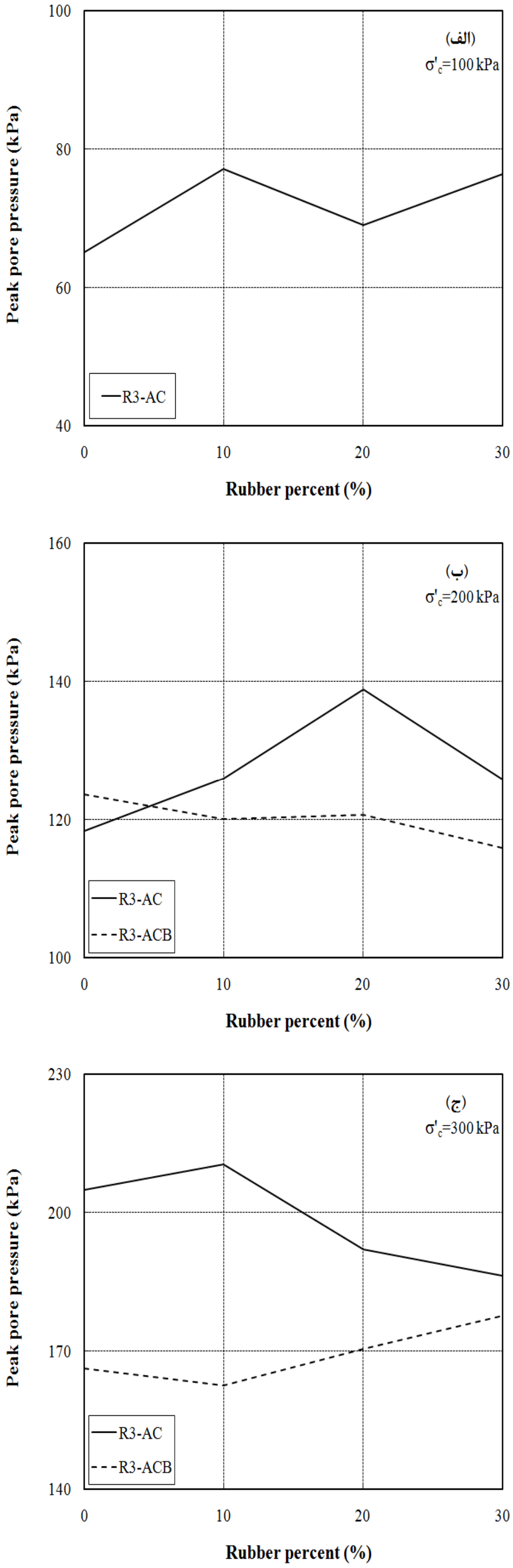
شکل ۷ نتایج آزمایش‌های سه‌محوری بر روی نمونه‌های مخلوط R3-ACB تحت تنش محصورکننده‌ی ۳۰۰kPa: الف) منحنی تنش انحرافی، ب) تغییرات فشار آب حفره‌ای و ج) مسیرتنش



شکل ۸ تغییرات زاویه‌ی اصطکاک داخلی
برحسب درصد خرده‌لاستیک

از این نمودارها می‌توان به این نتیجه رسید که فشار آب حفره‌ای تولید شده در فشار محصورکننده‌ی ۱۰۰kPa در نمونه‌های مخلوط رس AC نسبت به رس خالص زیاد می‌شود و میزان فشار آب حفره‌ای تولید شده در نمونه‌های رس- خرده‌لاستیکتقریباً یکسان و مستقل از درصد لاستیک است. در فشار محصورکننده‌ی ۲۰۰kPa اضافه فشار آب حفره‌ای در نمونه‌های رس مخلوط با ۱۰٪ و ۲۰٪ خرده‌لاستیک افزایش می‌یابد و سپس در نمونه‌های حاوی ۳۰٪ خرده‌لاستیک کاهش می‌یابد. در فشار محفظه‌ای ۳۰۰kPa با افزودن خرده‌لاستیک به رس خالص، میزان فشار آب حفره‌ای ابتدا در ۱۰٪ لاستیک بیشتر و سپس در درصدهای بالاتر کمتر می‌شود به‌طوری‌که در نمونه‌های با ۳۰٪ خرده‌لاستیک فشار آب حفره‌ای کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها مشاهده می‌شود.

برای نمونه‌های به‌دست آمده از رس ACB دو روند متفاوت در مورد فشار آب حفره‌ای ملاحظه می‌گردد به این صورت که در فشار محفظه‌ای ۲۰۰kPa فشار آب حفره‌ای نمونه‌ها با افزایش درصد خرده‌لاستیک کمتر می‌شود و در فشار محفظه‌ای ۳۰۰kPa با افزایش درصد خرده لاستیک، میزان فشار آب حفره‌ای بیشتر می‌شود.



شکل ۹ تغییرات فشارآب حفره‌ای حداکثر با درصد خرده‌لاستیک در فشارهای محصورکننده: الف) ۱۰۰kPa، ب) ۲۰۰kPa و ج) ۳۰۰kPa

اثر نوع رس

در ایــن تحقیــق از دو نــوع رس بــا خــواص خمیــری متفاوت استفاده شده است، بنابراین در ایــن بخــش بــه بررســی اثــر نــوع رس بــر روی پارامترهــای مختلــف پرداخته می‌شود.

مقاومت برشی

با بررسی نمودارها مشاهده می‌شود که مقاومت برشــی تمامی نمونه‌های حاوی رس AC نسبت به نمونه‌هــای حاوی رس ACB بیشتر اســت، لــیکن رونــد تغییــرات مقاومت برشی با درصد خرده‌لاســتیک در نمونــه‌هــای مخلوط دو نوع رس با هم متفاوت است. به‌این ترتیــب که در نمونه‌هــای مخلــوط رس AC – خــرده‌لاســتیک به‌طور کلی با افزایش درصد خــرده‌لاســتیک تــا حــدی (حدود ۲۰٪– ۱۰٪ خرده‌لاستیک) کاهش یافتــه و پــس از آن با افزایش خرده‌لاستیکمقاومت برشی نیــز بیشــتر می‌شود. به عبارت دیگر، نمونه‌های حــاوی ۲۰٪– ۱۰٪ خرده‌لاستیک دارای کمترین مقاومت برشی مــی‌باشــند. بر عکــس، در نمونــه‌هــای حــاوی رس ACB، کــلاً بــا افزایش درصــد خــرده‌لاســتیک مقاومــت برشــی کمتــر می‌شود.

فشار آب حفره‌ای (Δu) ناشی از برش

نتایج مربوط به تغییرات فشار آب حفره‌ای حــداکثر در شکل (۹) بیانگر آن است که نحوه‌ی تغییرات فشار آب حفره‌ای حداکثر بسته به نوع رس متفاوت است و روند آن به مقدار تنش تحکیمی مــؤثر نیــز بســتگی دارد. در تنش‌های تحکیمی مؤثر پایین، برای نمونه‌های مخلــوط رس با خمیری پایین، فشار آب حفره‌ای در نمونه‌هــای با خرده‌لاستیک حدود ۲۰٪ حداکثر مــی‌باشــد و بــرای نمونه‌هــای رس بــا خمیــری بــالا، بــا افــزایش درصــد خرده‌لاستیک فشــار آب حفــره‌ای انــدکی کــاهش پیــدا می‌کند. برعکس در تنش تحکیمی مؤثر بالا، فشــار آب حفره‌ای نمونه‌های حــاوی رس بــا خمیــری پــایین، در نمونــه‌ی بــا ۱۰٪ خــرده‌لاســتیک حــداکثر اســت. در نمونه‌هــای رس بــا خمیــری بــالا، بــا افــزایش درصــد خرده‌لاستیک فشار آب حفره‌ای نیز بیشتر می‌گردد.

خلاصه و جمع‌بندی

در این مقاله رفتار مکانیکی نمونه‌های رسی مخلوط بــا خرده‌لاستیک تحت بارگذاری یکنواخت مرور گردیــد. برای این منظور، آزمــایش‌هــای تــراکم و ســه‌محــوری یکنواخــت زهکشــی‌نشــده بــر روی نمونــه‌هــای رس مخلــوط بــا درصــدهای مختلــف خــرده‌لاســتیک در تنش‌های محصورکننده‌ی متفــاوت انجــام شــد. از ایــن آزمایش‌ها نتیجه گرفته شد که:

۱- با افزودن خرده‌لاستیک به رس خالص مقــادیر وزن مخصــوص خشــک حــداکثر و رطوبــت بهینــه‌ی مخلوط نسبت به رس خالص کاهش می‌یابد. یعنی می‌تــوان از مصــالح مخلــوط رس- خــرده‌لاســتیک به‌عنوان مصالح سبک در خاکریزها استفاده نمود.

۲- در صــورتی کــه رس دارای خمیــری پــایین باشــد افــزودن ۳۰٪ خــرده‌لاســتیک بــه رس مقاومــت را کــاهش نمــی‌دهــد، لــیکن در صــورتی کــه مقــدار لاستیک کمتر باشد مقاومت نسبت به برش خالص کمتر می‌شود. در خاک رس با نشانه خمیــری بــالا، افزودن هر مقدار خــرده‌لاســتیک بــه رس مقاومــت برشی نمونه‌ها را کاهش می‌دهد.

۳- در مورد زاویه‌ی اصطکاک داخلی مــی‌تــوان چنــین استدلال کرد کــه چــون ســختی خــاک رس AC از خــاک رس ACB بیشــتر اســت بنــابراین افــزودن خرده‌لاستیک به هر دو نوع رس، رفتار متفــاوتی در آنها مشاهده می‌شود. بدین صورت می‌توان توجیــه کــرد کــه ســختی ذرات رس AC بیشــتر از خــرده

لاستیک‌های مصرفی است، در نتیجه افزودن خرده‌لاستیک به رس AC باعث کاهش زاویه‌ی اصطکاک می‌گردد و در مورد مخلوط‌های رس ACB- خرده‌لاستیک عکس این قضیه صادق است. یعنی این‌که با افزودن خرده‌لاستیک به رس ACB، سختی نمونه نسبت به رس خالص افزایش می‌یابد و نهایتاً زاویه‌ی اصطکاک بیشتر می‌گردد.

٤- نحوه‌ی تغییرات فشار آب حفره‌ای حداکثر به نوع رس و تنش تحکیمی مؤثر بستگی دارد.

۵- در سازه‌های خاکی از قبیل خاکریزی پشت سازه‌های حائل می‌توان از مخلوط رس با نشانه خمیری پایین و خرده‌لاستیک با مقدار بهینه استفاده نمود که در این صورت هم مقاومت برشی خاک بیشتر می‌شود و هم فشار جانبی ناشی از خاک به‌علت سبک شدن مصالح کاهش می‌یابد. از این طریق می‌توان مواد زائد لاستیکی را نیز مدیریت نمود و در زمین دفن کرد.

مراجع

1. Humphrey, D.N., "Civil engineering applications of tire shreds", *Proceedings of the Tire Industry Conference,* Clemson University, pp. 1-16 (1999).

۲. سلطانی جیقه، ح.، سروش، ع.، "رفتار خاک‌های رسی مخلوط تحت بارگذاری یکنواخت"، نشریه‌ی علمی پژوهشی امیرکبیر، شماره‌ی ج-٦٧، شماره‌ی مجله ۲۱-۲۹، (۱۳۸٦).

۳. سلطانی جیقه، ح.؛ "رفتار مکانیکی خاک‌های رسی مخلوط تحت بارگذاری سیکلی و پس‌سیکلی"، رساله‌ی دکتری مهندسی عمران گرایش خاک و پی (ژئوتکنیک)، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، (۱۳۸۵).

4. Soroush, A., and Soltani-Jigheh, H., "Pre- and post-cyclic behavior of mixed clayey soils", *Canadian Geotechnical Journal,* Vol. 46 (2), pp. 115-128 (2009).

5. Vallejo, L. E., and Mawby, R.; "Void ratio influence on the shear strength of granular material-clay mixtures", *Engineering Geology*, Vol. 58 (2), pp.125-126 (2000).

6. Jafari, M.K. and Shafiee, A., "Mechanical behavior of compacted composite clays", *Canadian Geotechnical Journal,* Vol.41 (6), pp. 1152-1167 (2004).

7. Hoare, D.; "Synthetic Fabrics Soil Filter", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,* ASCE, Vol. 108(10), pp. 1230-1246 (1982).

۸. عبدی، م. و پارساپژوه، ع.، "بررسی خصوصیات تحکیم‌پذیری یک خاک رسی تسلیح شده توسط الیاف مصنوعی" ، هفتمین کنگره‌ی بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس تهران ، (۱۳۸۵).

۹. عبدی، م.، فرنیا، م. و پارساپژوه، ع.، "تأثیر رطوبت بر مقاومت برشی و شکل‌پذیری کائولینیت تسلیح شده توسط الیاف طبیعی و مصنوعی"، دومین کنگره‌ی ملی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، (۱۳۸٤).

10. Ghazavi, M., Sakhi, M.A., "Optimization of aspect ratio of waste tire shreds in sand–shred mixtures using CBR tests", *Geotechnical Testing Journal,* Vol. 28 (6), pp. 1–6, (2005).

۱۱. قضاوی، م. و برمکی، ا.، "تأثیر افزایش خرده‌لاستیک به خاک رس برای بهبود خواص انقباض‌پذیری آن"، دومین کنگره‌ی ملی مهندسی عمران، (۱۳۸٤).

12. Ingold, T.S., Miller, K.S., "Drained Axisymmetric Loading of Reinforced Clay". *Journal of Geotechnical Engineering,* ASCE, Vol. 109(7), pp. 883-898, (1983).

13. Ingold, T.S., "Reinforced clay subject to undrained triaxial loading", *Journal of Geotechnical Engineering,* ASCE, Vol. 109(5), pp. 738-744, (1983).

14. Bosscher, P. J., Edill, T. B., and Edlin, N. N., "Construction and performance of a shredded waste tire test embankment", Transportation Research Record 1345, Transportation Research Board, Washington, D.C, (1993).

15. Andersland OB, Khattak AS., "Shear strength of kaolinite/fiber soil mixture", *Proceedings of the first international conference on soil reinforcement,* Vol. I , pp. 11-16 Paris, (1979).

16. Nataraj, M.S., McManis, K.L., "Strength and deformation properties of soils reinforced with fibrillated fibers", *Geosynthetics International*, Vol. 4 (1), pp. 65–79, (1997).

17. Cetin, H., Fener, M., Gunaydin, O., "Geotechnical properties of tire-cohesive clayey soil mixtures as a fill material", *Engineering Geology*, Vol. 88 (1–2), pp. 110–120, (2006).

18. Kumar, A, Walia, B.S., Mohan, J., "Compressive strength of fiber reinforced highly compressible clay", *Journal of Construction and Building Materials,* Vol. 20 (10), pp. 1063-1068 (2006).

۱۹. مختاری، م.، پورحسینی، ر. و عبدلی، ن.، "تأثیر الیاف بر رفتار مکانیکی خاک تثبیت‌شده با آهک"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه یزد، (۱۳۸۸).

20. ASTM Standard D 2487, Standard practice for classification of soils for engineering purpose (Unified Soil Classification System), American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, PA, (2004).

21. ASTM Standard D 698, Standard test method for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort, American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, PA, (2004).